气候变化下泾河流域蓝绿水变化趋势及预测

张嘉琪[1,2,3]， 刘 招[1,2,3]， 韩忠青[1,2,3]， 王丽霞[4]， 张晋霞[1,2,3]，
岳甲寅[1,2,3]， 管子隆[5]

（1. 长安大学水利与环境学院，陕西 西安 710054；2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室，陕西 西安 710054；3. 长安大学水利部旱区生态水文与水安全重点实验室，陕西 西安 710054；4. 长安大学地质工程与测绘学院，陕西 西安 710054；5. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710065）

摘　要：基于泾河流域1980—2020年气象站点实测数据、水文站点实测径流数据及CMIP6未来气候模式，通过Delta降尺度的方法处理CMIP6气候数据，耦合SWAT（Soil and Water Assessment Tool）水文模型，探究流域内气候变化下蓝绿水的变化特征。结果表明：在SSP1-2.6路径下，研究区的蓝绿水量均呈现不显著上升趋势，在SSP3-7.0路径下，研究区蓝水量为不显著下降趋势，绿水量为显著上升趋势；在SSP5-8.5路径下，蓝水量为不显著下降趋势，绿水量为不显著上升趋势。3种路径下的多年平均蓝水量均较历史时期有所减小，多年平均蓝水量分别为128.8 mm、117.2 mm、126 mm，多年平均绿水量都有所增加，绿水量分别为372.7 mm、369.3 mm、372.1 mm，并且绿水系数均大于历史时期。蓝绿水空间分布特征均为从西北向东南地区递增，各路径之间蓝绿水的空间分布特征基本完全相同。

关键词：SWAT模型；Delta降尺度；气候变化；CMIP6气候模式；蓝绿水；泾河流域

随着经济社会的发展，水资源正在成为国家重要的战略资源[1]。在自然条件和经济条件的双重影响下，水资源短缺和空间分配不均衡的问题越来越严重，在我国最严格水资源管理制度下，水资源的有效配置与利用成为水资源管理中备受关注的话题。

1995年，Falkenmark等[2]率先提出蓝水、绿水的概念，并将其纳入水资源管理的考虑范畴，为水资源的管理开拓了新的研究领域。蓝水与绿水均为组成水资源的重要组成，蓝水指那些储存在湖泊、河川、径流以及地下含水层中[2]，可以直接为人类所利用的水；绿水则指那些源于雨水并储存在土壤中，之后通过植被的蒸腾作用被消耗掉的水[3]。蓝绿水在维持整个生态环境和社会经济发展中扮演着截然不同的角色，机会成本、物理机制以及社会效应呈现出明显的差异，均体现出各自的价值[4]。使用蓝绿水的概念对水资源进行定量评估可以改善地方以及区域范围的水资源管理[5]。过去几十年中，国内外学者都对蓝绿水资源进行了深度的研究。目前，对于蓝绿水的研究主要集中在分析蓝绿水的时空分布特征[6-8]、设置多种变化情景，定量分析蓝绿水对于土地利用及气候变化的响应，但是对于未来情形下蓝绿水的预测研究较少[9-11]，因此，本研究使用气候模型比较计划预测未来气候及蓝绿水的变化特征。

气候模型比较计划（Climate Model Intercomparison Project, CMIP）是由世界气候研究计划耦合模拟工作组（World Climate Research Programme, WCRP）发起的一个国际合作项目[12]。CMIP6数据近20 a来模式数量最多、模拟数据最大规模的一次国际耦合模式对比计划[13]。CMIP6基于最新的人为排放趋势及不同的共享社会经济路径（SSPs）提出了新的预估情景SSP-RCPs[14]。这些数据可以预测未来2100年

收稿日期：2024-04-21； **修订日期**：2024-09-21
基金项目：陕西省自然科学基础研究计划（2023-JC-QN-0372）；国家自然科学基金（42207084）
作者简介：张嘉琪（2001-），女，博士研究生，主要从事水文学及水资源研究. E-mail: zjq18991324073@163.com
通讯作者：刘招. E-mail: lz975@163.com

之前的气候变化。气候模式是研究未来气候变化的重要工具,但是由于气候模式的分辨率过低,对于流域的气候模拟效果较差,所以需要将低分辨率的气候模式数据转换为高分辨率的区域气候数或站点数据。

泾河是西北干旱、半干旱地区的重要河流,作为渭河最大支流,其河川径流作为沿岸广大地区的宝贵水源备受关注。研究泾河流域蓝绿水有利于更好地认识泾河流域径流演变规律,理解区域水文生态功能演替趋势,对于维持流域内的生态平衡、社会发展以及水资源配置都极为必要。本研究建立SAWT模型来模拟泾河流域内的水文循环过程,并通过张家山水文站实测月径流数据对模型进行率定和验证,进而确定模型在研究区的适用性,从而模拟出蓝绿水的时空演变情况,最后结合未来GCMs数据,选用CMIP6在SSP1-2.6(低强迫下的可持续发展路径)、SSP3-7.0(中高等强迫下的区域竞争路径)、SSP5-8.5(高强迫下的以传统化石燃料为主的路径)3种情境下的降水和气温数据预测泾河流域未来蓝绿水资源量的变化情况,以期为泾河流域未来水资源合理利用提供参考。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

泾河为黄河的二级支流,发源于宁夏六盘山东麓,流经宁夏、甘肃、陕西3省(区)30个县市,于陕西高陵县注入渭河,全长450 km,流域面积45421 km^2。泾河流域位于黄土高原中部(图1),流域内植被稀少,人为活动频繁,水土流失严重,为黄土高原严重水土流失区之一,也是黄河泥沙的主要来源地之一[15-16]。张家山水文站位于陕西省泾阳县王桥镇岳家坡村,系一类精度水文站,观测项目有泾河水位、流量、含沙量、水温、降水、蒸发、水质,本研究采用该站1980—2020年的实测逐日径流资料。

1.2 数据来源

高程数据(DEM)来源于地理空间数据云,分辨率为30 m;土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据中心,主要包括1980—2020年中的3期数据,分别为1980年、2000年、2020年,分辨率为30 m;土壤数据来源于世界土壤数据库(HWSD);气象数据采用泾河流域内及其周边12个气象站点1980—2020年的日气象数据,来源于中国气象数据网;水文数据选取泾河流域出口水文站——张家山水文站1980—2020年逐日实测径流资料,数据来源于黄河水利委员会。研究所采用的数据来源如表1所示。

CMIP6数据选取降水、最高气温、最低气温3个因子,选用1975—2014年为历史基准期,2021—2050年为未来期进行研究。根据CMIP6数据的适用性,选取CMCC-ESM2模式下的3种SSPs情景的逐日数据。

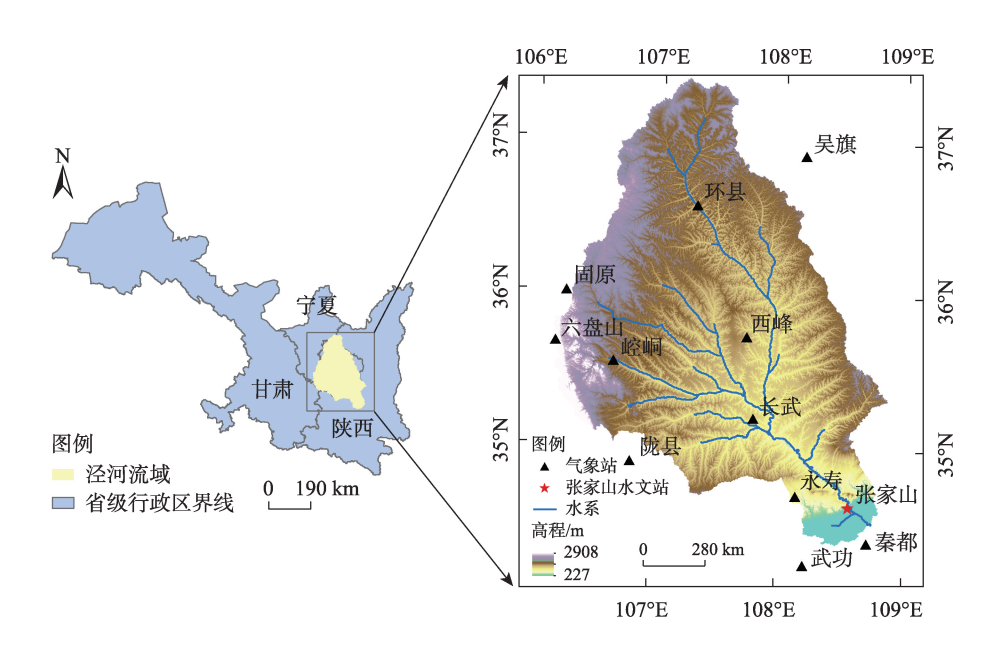


图1 泾河流域位置示意图

Fig. 1 Location map of the Jinghe River Basin

表1　数据来源

Tab. 1　Data sources

数据名称	数据年份	分辨率	数据来源	网址
DEM数据	2020年	30 m	地理空间数据云	https://www.gscloud.cn
土地利用数据	1980年、2000年、2020年	30 m	中国科学院资源环境数据中心	https://www.resdc.cn
土壤类型	2020年	1 km	世界土壤数据库	https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/
实测气象数据	1980—2020年	日值	中国气象数据网	https://data.cma.cn
实测径流数据	1980—2020年	日值	黄河水利委员会	
未来气候数据	1975—2014年(基准期)	日值	CMCC-ESM2模式	https://aims.llnl.gov/search/cmip6/
	2021—2050年(未来期)	日值		

2　研究方法

2.1　蓝绿水计算方法

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)开发的分布式流域水文模型,在径流模拟、面源污染控制、气候及下垫面变化影响分析等方面有较多应用[17]。

本研究基于蓝绿水的概念和SWAT模型的模拟结果,将子流域内产水量(*WYLD*)(mm)和深层含水层的补给量(*DA_RCHG*)(mm)相加表示流域蓝水量,将实际蒸散发(*ET*)(mm)和土壤含水量(*SW*)(mm)相加表示绿水量,绿水系数(*GWC*, Green Water Coefficient)用某一流域绿水资源占总水资源量的比例表示。计算公式如下:

$$B = WYLD + DA_RCHG \tag{1}$$

$$G = ET + SW \tag{2}$$

$$GWC = \frac{G}{G+B} \times 100\% \tag{3}$$

式中: G 为绿水资源量(mm),包括绿水流和绿水储水; B 为蓝水资源量(mm)。

2.2　Delta降尺度方法

Delta降尺度方法是由美国国家评价中心(http://www.nacc.usgcrp.gov/)推荐的可用于生成未来气候情景的一种统计降尺度方法[18]。Delta降尺度方法是将气象站点历史实测数据与模拟网格点的同期模拟的气象要素数据的相对变化或绝对变化叠加到未来气候情景下的GCMs网格点上,从而得到降尺度和偏差修正后的未来不同情景下的气候模式数据。

降水与温度的修正方法略有不同,对于降水是将实测站点月平均降水量与其同时期的GCMs模拟的历史时期的站点月平均降水量做比值,再将比值乘以GCMs预测的未来气象站点的降水量,计算公式如下:

$$P_{fu} = \frac{P_{obs}}{P_{Gobs}} \times P_{Gfu} \tag{4}$$

式中: P_{fu} 为Delta降尺度完成后的未来时期降水量(mm); P_{obs} 为历史时期站点实测降水量(mm); P_{Gobs} 为GCMs模拟的历史时期降水量(mm); P_{Gfu} 为GCMs预测的未来时期降水量(mm)。

对于气温是将实测站点月平均最高气温(最低气温)与其同时期的GCMs模拟的历史时期的站点月平均最高气温(最低气温)做差值,再将差值加上GCMs预测的未来气象站点的最高气温(最低气温),计算公式如下:

$$T_{fu} = T_{obs} - T_{Gobs} + T_{Gfu} \tag{5}$$

式中: T_{fu} 为Delta降尺度完成后的未来时期气温(℃); T_{obs} 为历史时期站点实测气温(℃); T_{Gobs} 为GCMs模拟的历史时期气温(℃); T_{Gfu} 为GCMs预测的未来时期气温(℃)。

3　结果与分析

3.1　模式适用性分析

为验证CMCC-ESM2模式在泾河流域对降水和气温的模拟能力,本研究将1980—2014年作为验证基准期,将站点实测月平均降水、月均最高气温及月均最低气温与GCMs历史数据进行对比,采用相关性系数 R^2 及均方根误差RMSE来评估模式在泾河流域的适用性[19]。由表2可知,该模式对于温度的模拟效果较降水的模拟效果好,温度的相关性系数>0.9,降水的相关性系数>0.6,降水均方根误差为3.3 mm,气温均方根误差均<3 ℃,基本符合要求,

表2 月均降水量、最高气温及最低气温R^2和RMSE

Tab. 2 Monthly average precipitation, maximum temperature, and minimum air temperature R^2 and RMSE

因子	相关系数R^2	均方根误差RMSE
月平均降水量	0.643	3.3 mm
月均最高气温	0.955	2.92 ℃
月均最低气温	0.981	1.78 ℃

说明CMCC-ESM2模式在泾河流域的适用性较好，可以用来预测未来的降水及气温变化。

3.2 历史气候变化特征

气候变化对于流域内蓝绿水的变化情况具有重要作用，因此，研究1980—2020年泾河流域内降水及年均最高、最低气温有利于帮助探究蓝绿水的变化趋势[20]。本研究通过绘制泰森多边形各气象站点的控制面积权重计算得到区域气象要素变化序列。由图2可知，流域年均降水量变化平稳，总体呈现波动上升趋势。历史最大年均降水量出现在2003年，为719.9 mm。年均最高气温在13~18 ℃之间，多年平均最高气温为15.5 ℃，历史年均最高气温出现在2016年，为17.2 ℃；年均最低气温在3~6 ℃之间，多年平均最低气温为4.5 ℃，历史年均最低气温出现在1984年，为3.3 ℃。年均最高、最低气温变化趋势大致相同，均呈现稳步上升趋势。

为进一步研究泾河流域内气象变化特征，利用Mann-Kendall[21-22]（MK）检验方法对流域内年均降水量、年均最高气温以及年均最低气温进行趋势性检验。检验结果表明，降水通过95%的显著性检验，表现为显著上升趋势，而年均最高气温以及年均最低气温并未通过95%的显著性检验，表现为不显著上升趋势。

通过反距离权重法对泾河流域气象因素进行空间分析，泾河流域的气象因素在空间上差异较不显著。由图3可知，泾河流域历史时期的多年平均降水以及多年平均最高、最低气温总体均呈现出由北向南递增的趋势。多年平均降水的高值出现在流域西部，低值主要分布在流域北部；多年平均最高气温的高值出现在流域的东南地区，低值出现在流域西部；多年平均最低气温的高值同样出现在流域西南地区，低值出现在流域西部。

3.3 SWAT模型及历史蓝绿水模拟

设置模型的预热期为5 a，时间尺度为日尺度，模型设置的率定期为1990—2005年，验证期为2006—2020年。

3.3.1 流域参数的敏感性分析 本研究选择了对泾河流域蓝绿水研究敏感程度较高的33个参数。由结果可知，SWAT模型对于泾河流域的模拟对CN2（SCS径流曲线系数）、CH_K2（主河道河床有效水力传导度）、ALPHA_BNK（河岸基流α因子）、GW_DELAY（地下水延迟系数）4个参数最为敏感。选用SWAT-CUP软件中SUF-2程序对模型进行率定，本研究设置模拟次数为1000次，迭代次数为5次，得到的SWAT模型率定最优参数组见表3所示。

3.3.2 模型的率定与验证 本研究采用张家山水文站实测月径流数据对流域SWAT模型的模拟结果进行率定和验证，率定结果见图4所示，率定期相关系数R^2、纳什系数NSE和相对误差RE分别为0.72、0.72和0.5%；验证期R^2、NSE和RE分别为0.72、0.63和0.65%，结果显示R^2均>0.7，NS均>0.6，表明模型

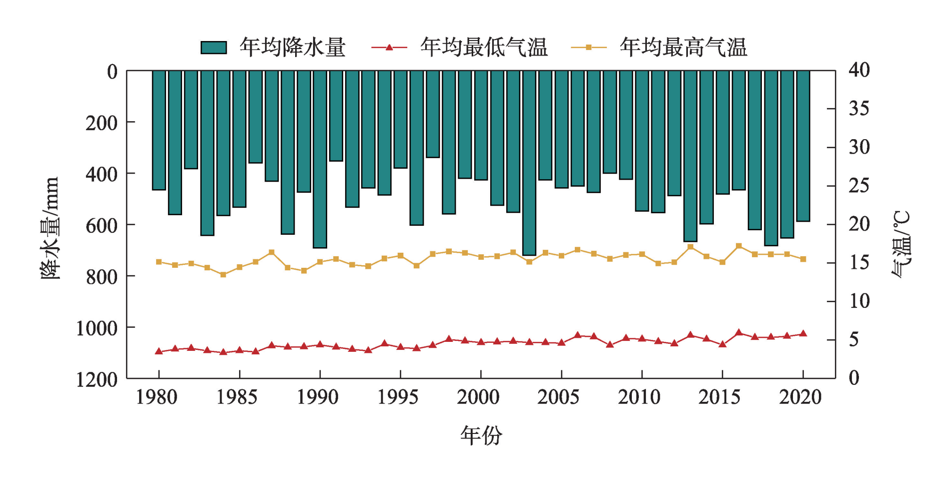


图2 泾河流域1980—2020年各气象要素变化趋势

Fig. 2 Changes in various meteorological elements in the Jinghe River Basin from 1980 to 2020

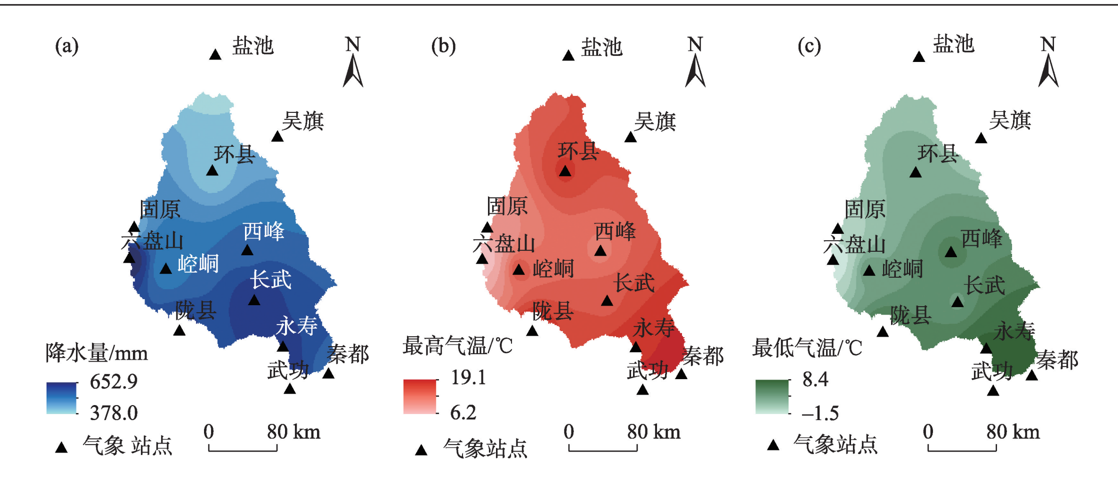


图3 泾河流域历史时期多年平均降水、最高气温和最低气温空间分布

Fig. 3 Spatial distribution map of annual average precipitation, maximum temperature, and minimum temperature in the historical period of the Jinghe River Basin

表3 泾河流域径流敏感性参数及模型最优参数组

Tab. 3 Sensitivity parameters of runoff and the optimal parameter group of the model in the Jinghe River Basin

序号	参数	最优值	序号	参数	最优值
1	V_EVRCH	0.337	18	V_REVAPMN	472.001
2	V_TRNSRCH	0.427	19	V_RCHRG_DP	0.365
3	V_ESCO	1.200	20	V_SLSUBBSN	37.204
4	V_EPCO	0.439	21	V_FFCB	0.786
5	V_SURLAG	55.711	22	V_SHALLST	23562.256
6	V_CH_K1	93.200	23	V_DEEPST	34715.676
7	V_CH_N1	-3.083	24	V_SFTMP	-13.548
8	V_CH_N2	-0.019	25	V_SMTMP	-0.338
9	V_CH_K2	123.386	26	V_SMFMX	-2.317
10	V_ALPHA_BNK	0.346	27	V_SMFMN	7.732
11	V_CN2	81.835	28	V_TIMP	0.308
12	V_CANMX	-1.538	29	V_SOL_AWC	0.244
13	V_OV_N	18.574	30	V_TLAPS	-0.926
14	V_GW_DELAY	16.481	31	V_HRU_SLP	0.599
15	V_ALPHA_BF	0.500	32	V_SOL_BD	3.356
16	V_GWQMN	1084.731	33	V_SOL_K	1367.089
17	V_GW_REVAP	0.131			

模拟的结果均符合标准,说明模型在泾河流域适用性较好,可用于研究流域内蓝绿水的研究。

3.3.3 *历史时期蓝绿水变化分析* 根据SWAT模型的运行结果,泾河流域1980—2020年多年蓝水量在86.1~234.9 mm之间,多年平均蓝水量为152.5 mm,多年绿水量在331.2~390.7 mm之间,多年平均绿水量为364.8 mm,蓝绿水量均表现出增加趋势。泾河流域绿水量较蓝水量更为丰富,绿水量大约是蓝水量的2.4倍。年平均蓝水量的最大值出现在2003年,为234.9 mm;年平均绿水量的最大值出现在2018年,为388.8 mm(图5)。

为进一步探究蓝绿水量与气候的关系,对蓝绿水量分别进行MK趋势检验,检验统计量分别为2.1156和3.5938,结果表明,蓝绿水量均通过95%的显著性检验,表现为显著增加趋势。降水量和蓝水量均呈现增加趋势,且变化趋势为正相关,皮尔逊相关系数达到0.99,这表明蓝水的形成与降水直接相关;蓝水量与气温的相关性较差。绿水与降水及气温的变化趋势也为正相关,相关系数为0.66和0.45,表明气温升高或降水增多,均会使得流域内蒸

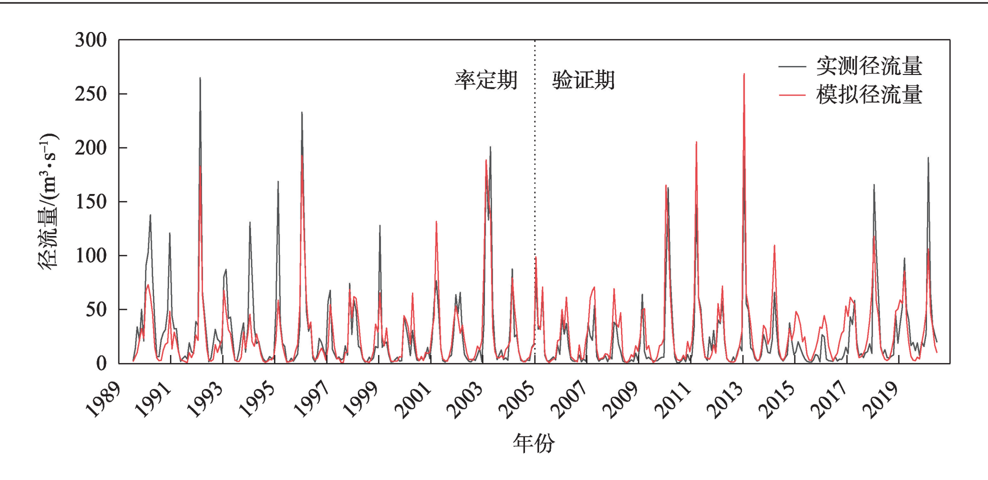


图4　泾河流域张家山水文站月径流模型模拟结果

Fig. 4　Simulation results of monthly runoff model at Zhangjiashan hydrological station in the Jinghe River Basin

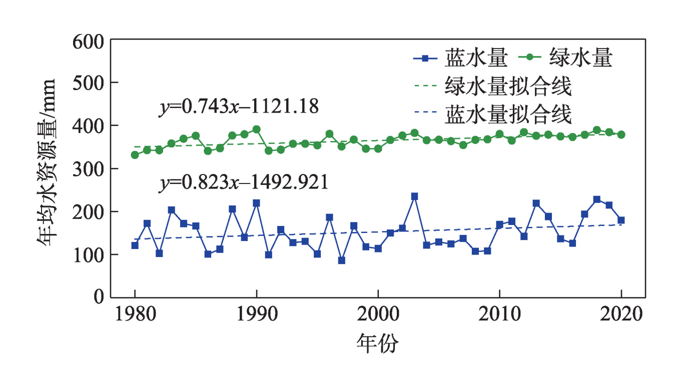


图5　历史时期蓝绿水变化趋势

Fig. 5　Trend of changes in blue-green water during historical periods

发蒸腾作用增强。

泾河流域多年平均蓝绿水的空间分布差异性显著，由图6可以看出，蓝水和绿水在空间上的分布趋势基本一致，均表现出从西北向东南地区递增，在量的分布上，蓝水的高值出现在流域的中部及南部，绿水的高值出现在流域的东部及南部；蓝绿水的低值均出现在流域的西北部及中部。这与流域内降水、气温的空间分布存在一定的关系。

3.4 未来时期气候变化特征

选用SSP1-2.6、SSP3-7.0及SSP5-8.5 3种浓度路径进行研究。由图7可以看出，在未来气候情景

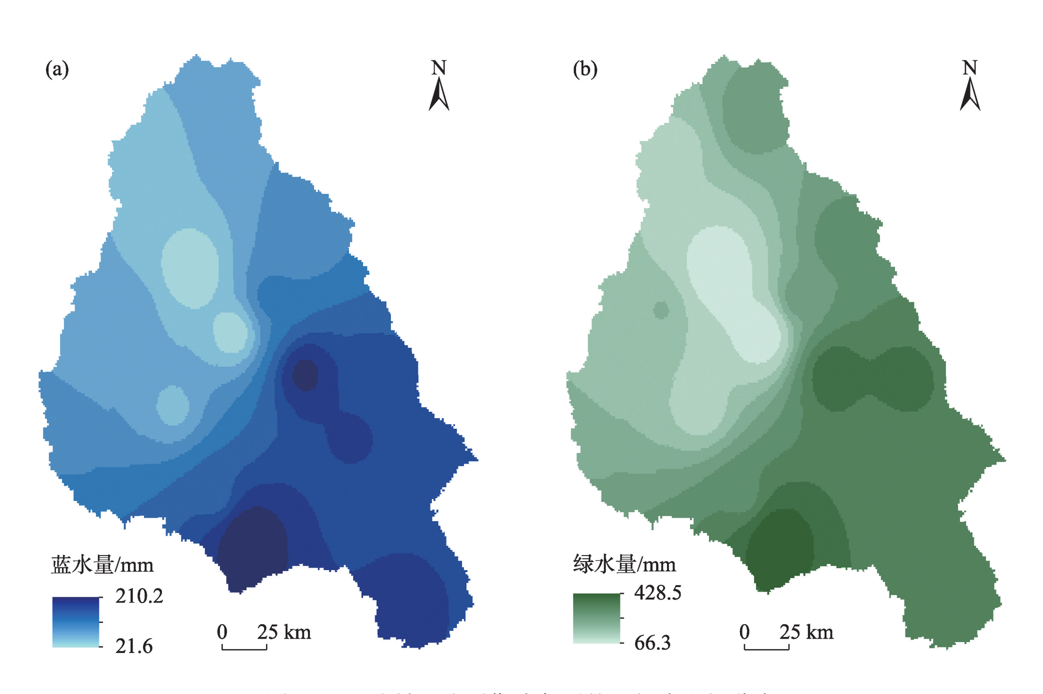


图6　泾河流域历史时期多年平均蓝绿水空间分布

Fig. 6　Spatial distribution map of annual average blue-green water in the historical period of the Jinghe River Basin

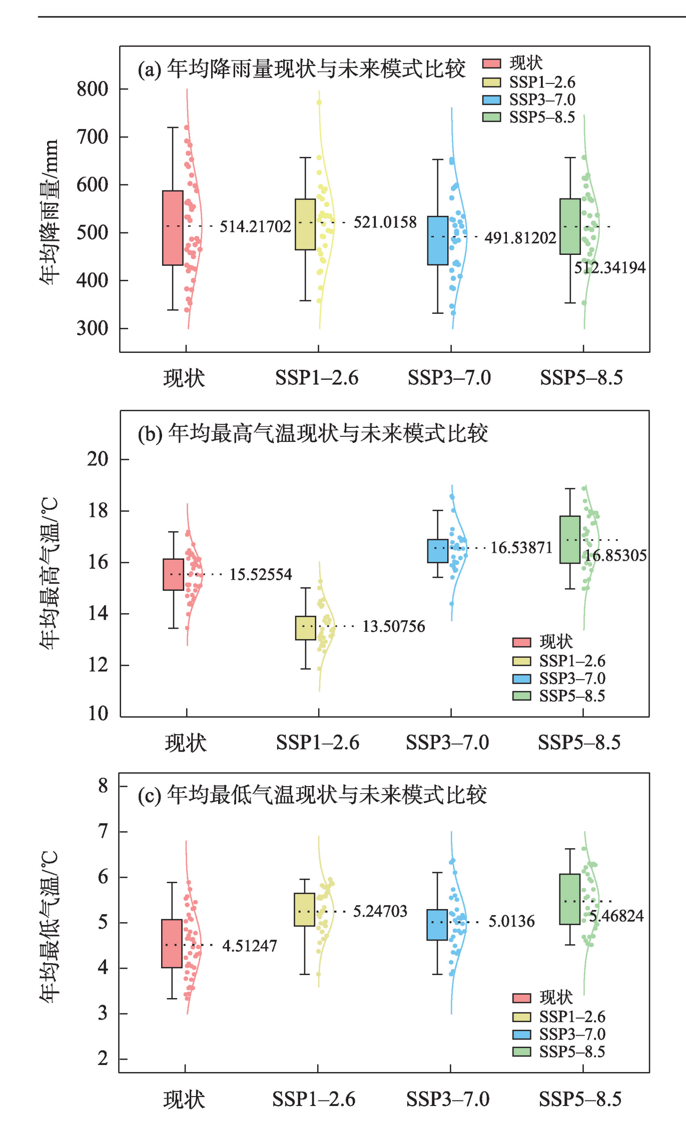


图7　气候现状与未来气候模式比较箱线图

Fig. 7　Box plot comparing current and future climate patterns

下(2021—2050年)，SSP1-2.6路径下的多年平均降水量较现状增大，SSP3-7.0及SSP5-8.5路径下的多年平均降水量较现状减小，但总体上变化较小，且未来降水量的变化趋势与浓度路径的关系并不明确。SSP1-2.6路径下的多年平均最高气温较现状减小，大约减小了13%，SSP3-7.0及SSP5-8.5路径下的最高气温较现状增大，分别增大了约6.5%、8.6%，且随着路径浓度的升高，最高气温也随之逐渐增大。3种路径下的多年最低气温均较历史时期有所升高，分别增加了16.3%、11.1%、21.2%，SSP5-8.5路径下的多年最低气温均值最高。整体来看，多年均值气温随着排放浓度的增加而增大，只有SSP1-2.6路径下的多年均值气温较历史时期小，SSP3-7.0及SSP5-8.5路径下的多年均值气温均较历史时期有所增加，符合人类活动与气温的一般规律。

根据MK检验结果，3种路径下各气候因子的时间序列检验统计量|Z|均<1.96，未通过95%显著性检验，SSP3-7.0路径下的降水为不显著减少趋势，其余气候因子为不显著增加趋势，这表明未来30 a气候变化平稳，波动幅度不大。未来各气候因子的空间分布情况与历史气候因子的分布情况基本相同，均为由北向南递增的格局。

3.5　未来时期蓝绿水变化特征

根据线性回归方程及MK检验结果，在SSP1-2.6路径下，研究区的蓝绿水量均呈现不显著上升趋势；在SSP3-7.0路径下，研究区蓝水量为不显著下降趋势，绿水量为显著上升趋势；在SSP5-8.5路径下，蓝水量为不显著下降趋势，绿水量为不显著上升趋势，流域蓝绿水资源总量整体较历史时期有所减少。这与未来降水及气温的变化趋势基本吻合，说明未来流域水资源短缺情况加剧，且河流径流量总体有下降趋势。

3种路径下的多年平均蓝水量都较历史时期有所减小，多年平均蓝水量分别为128.8 mm、117.2 mm、126 mm，分别减小了23.7 mm、35.3 mm、26.5 mm；多年平均绿水量都有所增加，绿水量分别为372.7 mm、369.3 mm、372.1 mm，分别增加了7.9 mm、4.5 mm、7.3 mm，这说明在未来时期，泾河流域的绿水系数将较历史时期有所增加，绿水系数可以表征绿水资源的储量，对农业生产以及农业灌溉的合理安排都有重要意义，在未来气候下，绿水系数均在70%左右，这说明未来一段时间内，绿水量将持续高于蓝水量，并且绿水资源占流域水资源总量的占比增大，绿水在泾河流域发挥着越来越大的作用。

在探究未来气候模式下蓝绿水的变化趋势中，SSP1-2.6模式下的蓝绿水量虽然呈现出不显著上升趋势，但是未来多年平均蓝绿水较历史时期有所减少；这说明蓝水量的模拟值整体偏小，究其出现的原因可能为使用SWAT模型时出现的误差及选取的气候模式在泾河区域的局限性。

由图8可以看出，未来气候模式下泾河流域蓝绿水空间分布特征与历史时期的蓝绿水空间分布特征没有太大变化，均为从西北向东南地区递增，各路径之间蓝绿水的空间分布特征基本完全相同，

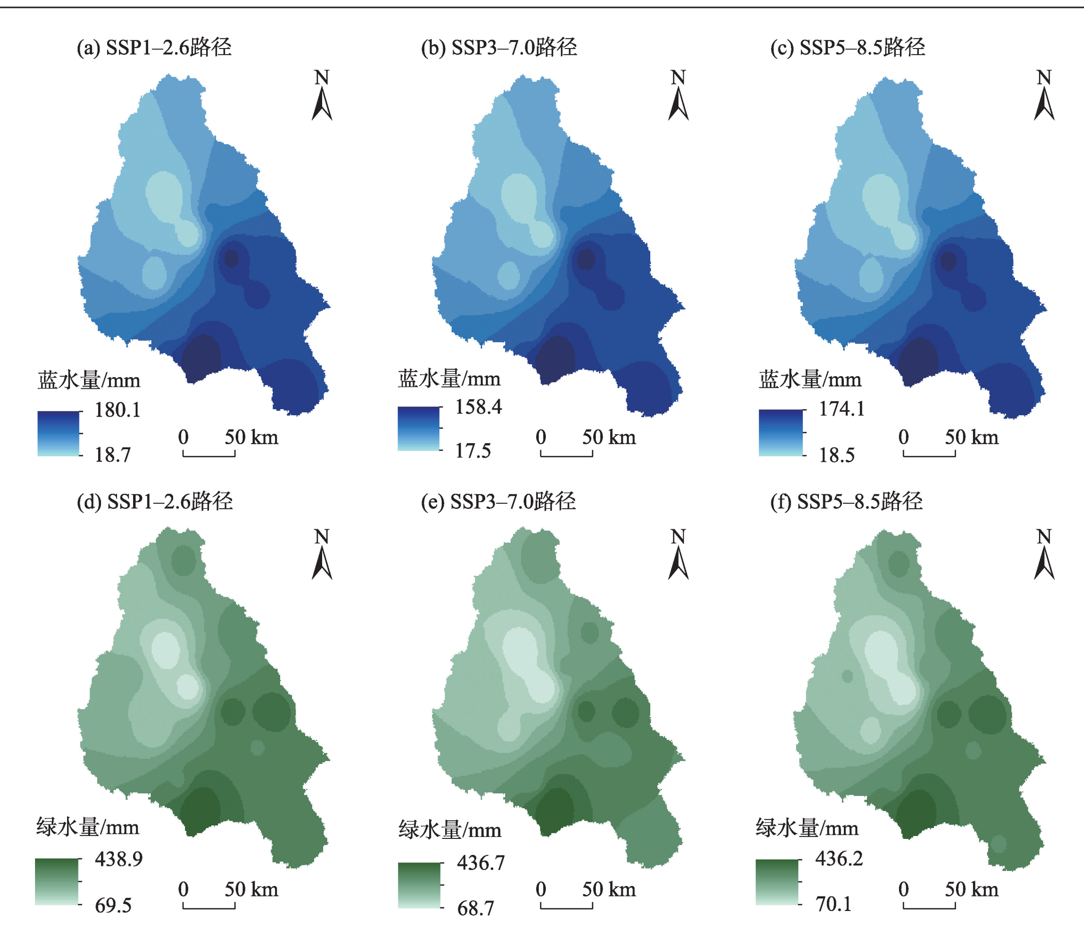


图8 未来气候模式下多年平均蓝绿水空间分布特征

Fig. 8 Spatial distribution characteristics of annual average blue-green water under future climate models

且与降水量的空间分布相似。蓝水的最值出现在流域中部及南部，绿水的高值出现在流域的南部及中东部。未来气候模式下流域东南部的绿水量较历史时期相对减少，低值区域由流域的西北边缘地区向中部移动，东南部的高值区域范围缩小；蓝水量东南部较历史时期无明显变化，流域西北地区的蓝水量低值范围增大。

4 讨论

李蓝君[23]基于NorESM2-MM模式使用BDRF降尺度方法预测黄土高原地区的降水的波动整体较为平缓，而最高气温与最低气温则明显增加；豆明玉等[24]使用22种CMIP6模式预测了黄土高原地区将面临增温压力，排放情景越高增温越显著，本文的研究结果与前人的研究结果基本具有一致性，而与部分研究结果[25-26]有一定的差别，究其原因，可能是影响蓝绿水的因素不单单为气候因素，还包括人类活动、下垫面条件改变等其余因素，本研究未能考虑全面，后续可以加入退耕还林、农业灌溉及国家相应的土地政策等土地利用的变化情况进行进一步的探索；原因也可能与CMCC-ESM2模式对于泾河流域的适应性及Delta降尺度的效果有关，本文仅选用一种模式及一种降尺度方法，后续的研究可以选取多个模式及多种降尺度方法进行适应性分析来进行进一步的探索。

本研究发现，泾河流域蓝绿水的变化趋势与未来情境下的降水及气温的变化趋势密切相关，蓝水主要受降水的影响，因此，蓝水变化趋势与降水的变化趋势基本相同；绿水的主要组成部分为植物蒸发蒸腾，因此，绿水主要受气温影响，随着路径的改变，碳排放浓度上升，气温也随之增加，绿水量在3种路径中均呈现出一定的上升趋势，这表明未来流域气温升高，干旱情况可能加剧，径流量减小，更多的降水通过蒸发蒸腾作用转换为绿水。

同时，绿水资源对于农业灌溉等方面有重要意义，且绿水系数可以表征绿水资源占水资源总量的占比。而本研究结果表明泾河流域在未来气候模

式下,研究区内蓝水资源量较少,绿水资源较为丰富,绿水量将会持续高于蓝水量,绿水系数也将升高,这说明绿水在该流域发挥着越来越重要的作用。但是绿水资源的开发潜力未被完全挖掘,因此,泾河流域水资源管理应转变管理思维,合理开发蓝绿水资源,促使流域蓝绿水资源供需平衡。

5 结 论

本研究在建立泾河流域SWAT分布式水文模型的基础上,基于CMIP6数据集中的CMCC-ESM2模式,分析计算了SSP1-2.6、SSP3-7.0、SSP5-8.5 3种路径下的泾河流域蓝绿水在未来气候模式下的变化特征,得出如下结论:

(1) 泾河流域多年降水量在338~719 mm之间,年均最高气温在13~18 ℃之间,年均最低气温在3~6 ℃之间。降水表现为显著上升趋势,而年均最高气温以及年均最低气温表现为不显著上升趋势。泾河流域的气象因素在空间上差异较不显著。泾河流域历史时期的多年平均降水以及多年平均最高、最低气温总体均呈现出由北向南递增的趋势。

(2) 泾河流域1980—2020年多年蓝水量在86.1~234.9 mm之间,多年绿水量在331.2~390.7 mm之间。蓝水的形成与降水直接相关;蓝水量与气温的相关性较差。绿水与降水及气温的变化趋势也为正相关且相关性较强。蓝水和绿水在空间上的分布趋势基本一致,均表现出从西北向东南地区递增。

(3) 未来气候下各气候因子变化较为平稳,SSP3-7.0路径下的降水为不显著减少趋势,其余气候因子为不显著增加趋势。未来各气候因子的空间分布情况与历史气候因子的分布情况基本相同,均为由北向南递增的格局。

(4) 在SSP1-2.6路径下,研究区的蓝绿水量均呈现不显著上升趋势,在SSP3-7.0路径下,研究区蓝水量为不显著下降趋势,绿水量为显著上升趋势;在SSP5-8.5路径下,蓝绿水均为不显著上升趋势。3种路径下的多年平均蓝水量都较历史时期有所减小,多年平均绿水量都有所增加,未来气候模式下泾河流域蓝绿水空间分布特征与历史时期的蓝绿水空间分布特征没有太大变化,均为从西北向东南地区递增,各路径之间蓝绿水的空间分布特征基本完全相同。

参考文献(References):

[1] 左其亭, 胡德胜, 窦明, 等. 基于人水和谐理念的最严格水资源管理制度研究框架及核心体系[J]. 资源科学, 2014, 36(5): 906-912. [Zuo Qiting, Hu Desheng, Dou Ming, et al. Framework and core system of the most stringent water resource management system based on the concept of human-water harmony[J]. Resources Science, 2014, 36(5): 906-912.]

[2] Falkenmark M, Rockstrom J. Building water resilience in the face of global change: From a blue-only to a green-blue water approach to land-water management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2010, 136(6): 606-610.

[3] 司鹏, 郝立生, 傅宁, 等. 河北保定百年均一化逐日气温序列的建立及其气候变化特征[J]. 大气科学学报, 2023, 46(2): 297-309. [Si Peng, Hao Lisheng, Fu Ning, et al. Establishment of homogenized daily temperature series for Baoding in Hebei Province and its climate characteristics over a century-long scale[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(2): 297-309.]

[4] 高姗. 中国经济发展中的生态环境保护——“金山银山不如绿水青山”的辩证思考[J]. 中国国际财经(中英文), 2018(9): 266. [Gao Shan. Ecological environment protection in China's economic development: A dialectical reflection on “Gold and Silver Mountains are Better than Green Waters and Green Mountains”[J]. China International Finance (in both Chinese and English), 2018(9): 266.]

[5] Veettil A V, Mishra A K. Water security assessment using blue and green water footprint concepts[J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 589-602.

[6] 童凯, 赵银军, 胡宝清, 等. 基于SWAT模型的典型厄尔尼诺/拉尼娜年广西北部湾南流江蓝绿水评估[J]. 水电能源科学, 2023, 41(10): 46-49. [Tong Kai, Zhao Yinjun, Hu Baoqing, et al. Assessment of blue/green water in typical El Niňo/La Niňa years in the Nanliu River Basin, Beibu Gulf Based on SWAT model[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(10): 46-49.]

[7] 康文东, 倪福全, 邓玉, 等. 利用SWAT模型分析乌江流域蓝绿水时空分布特征[J]. 中国农业气象, 2023, 44(6): 469-478. [Kang Wendong, Ni Fuquan, Deng Yu, et al. Spatial and temporal variation characteristics of blue-green water resources in Wujiang River Basin based on SWAT model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2023, 44(6): 469-478.]

[8] 齐文华, 金艺华, 尹振浩, 等. 基于SWAT模型的图们江流域蓝绿水资源供需平衡分析[J]. 生态学报, 2023, 43(8): 3116-3127. [Qi Wenhua, Jin Yihua, Yin Zhenhao, et al. Analysis of blue and green water scarcity based on SWAT model in the Tumen River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3116-3127.]

[9] 康文东, 倪福全, 邓玉, 等. 乌江流域蓝绿水对气候和土地利用变化的响应[J]. 农业工程学报, 2023, 39(19): 131-140. [Kang Wendong, Ni Fuquan, Deng Yu, et al. Response of blue and green

water to climate and land use changes: A study in the Wujiang River Basin,China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(19): 131−140.]

[10] 崔周宇, 杨肖丽, 李文婷, 等. 气候与土地利用变化下黄河源区蓝绿水量的时空响应研究[J]. 水文, 2023, 43(2): 66−71, 7. [Cui Zhouyu, Yang Xiaoli, Li Wenting, et al. Responses of blue and green water to climate change and landuse change in the source region of the Yellow River[J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(2): 66−71, 7.]

[11] Zhang Y F, Tang C J, Ye A Z, et al. Impacts of climate and landuse change on blue and green water: A study case of the upper Ganjiang River Basin[J]. Water, 2020, 12(10): 2661.

[12] 戴军, 胡海珠, 毛晓敏, 等. 基于CMIP6多模式预估数据的石羊河流域未来气候变化趋势分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(10): 1547−1562. [Dai Jun, Hu Haizhu, Mao Xiaomin, et al. Future climate change trends in the Shiyang River Basin based on the CMIP6 muti-model estimation data[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(10): 1547−1562.]

[13] Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. Overview of the Coupled model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization[J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9(5): 1937−1958.

[14] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌, 等. CMIP6情景模式比较计划(ScenarioMIP)概况与评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 519−525. [Zhang Lixia, Chen Xiaolong, Xin Xiaoge, et al. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP)[J]. Climate Change Research, 2019, 15(5): 519−525.]

[15] 闵庆文, 何永涛, 李文华, 等. 基于农业气象学原理的林地生态需水量估算——以泾河流域为例[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2130−2135. [Min Qingwen, He Yongtao, Li Wenhua, et al. Estimation of forests' ecological water requirement based on agrometeorology: Taking Jinghe Watershed as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(10): 2130−2135.]

[16] 郑培龙, 李云霞, 赵阳, 等. 黄土高原泾河流域气候和土地利用变化对径流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 20−24. [Zheng Peilong, Li Yunxia, Zhao Yang, et al. Effects of climate variation and landuse change on runoff in Jinghe Basin of the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(5): 20−24.]

[17] 何旭强. 基于SWAT模型的黑河上游径流模拟及其对气候变化的响应[D]. 兰州:西北师范大学, 2013. [He Xuqiang. Runoff Simulation and Response to Climate Change in the Upper Reaches of the HeiHe River Basin Based on SWAT Model[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013.]

[18] Onyutha C, Tabari H, Rutkowska A, et al. Comparison of different statistical downscaling methods for climate change rainfall projections over the Lake Victoria basin considering CMIP3 and CMIP5 [J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2016, 12: 31−45.

[19] 吴琛, 王景才, 邵俊博, 等. CMIP6模式对淮河中上游流域气候要素模拟效果的评估研究[J]. 人民珠江, 2023, 44(10): 105−116. [Wu Chen, Wang Jingcai, Shao Junbo, et al. Simulation effect evaluation of CMIP6 models on climatic elements in Huai River Basin[J]. Pearl River, 2023, 44(10): 105−116.]

[20] Yuan Z, Xu J J, Wang Y Q. Historical and future changes of blue water and green water resources in the Yangtze River source region, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 138(1−2): 1035−1047.

[21] Alashan S. Combination of modified Mann-Kendall method and Sen innovative trend analysis[J]. Engineering Reports, 2020, 2(3): e12131.

[22] Haddad M, Bonaduce A. On the long-term mediterranean sea level variability; proceedings[C]//Hammamet, TUNISIA: The 1st Springer Conference of the Arabian-Journal-of-Geosciences (CAJG), F Nov 12−15, 2018.

[23] 李蓝君. 黄土高原沟壑区典型植被作用下水平衡要素及水相关生态服务的变化机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023. [Li Lanjun. Study on the Change Mechanism of Water Balance Component and Water-related Ecosystem Services under Typical Vegetation Species in the Gully Region of the Loess Plateau[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.]

[24] 豆明玉, 段克勤, 石培宏, 等. 基于CMIP6多模式的黄土高原气温变化模拟评估及情景预估[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 158−167. [Dou Mingyu, Duan Keqin, Shi Peihong, et al. Historical evaluation and scenario prediction of temperature changes the Loess Plateau based on CMIP6 multimodels[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 158−167.]

[25] 刘欢. 典型流域径流及其组分变化的归因分析与预测[D]. 西安: 西安理工大学, 2023. [Liu Huan. Attributive Analysis and Prediction of Typical Watershed Runoff and Its Component Changes[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.]

[26] 朱天生. 未来气候模式下黄河流域径流变化归因研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2022. [Zhu Tiansheng. Attribution Analysis of Runoff Change in the Yellow River Basin under Climate Model[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.]

Trend change and prediction of blue-green water in the Jinghe River Basin under climate change

ZHANG Jiaqi[1,2,3], LIU Zhao[1,2,3], HAN Zhongqing[1,2,3], WANG Lixia[4],
ZHANG Jinxia[1,2,3], YUE Jiayin[1,2,3], GUAN Zilong[5]

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Key Laboratory of Eco-hydrology and Water Security in Arid and Semi-arid Regions of Ministry of Water Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. Powerchina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: In this study, we analyzed meteorological data from 1980 to 2020, hydrological runoff data, and future climate models from CMIP6 in the Jinghe River Basin. The CMIP6 climate data was processed using the delta downscaling method and coupled with the Soil and Water Assessment Tool hydrological model to investigate the variations in blue-green water due to climate change in the basin. The results showed that under the SSP1−2.6 pathway, the blue-green water content in the study area exhibited an insignificant upward trend. Under the SSP3−7.0 pathway, the blue water content showed an insignificant downward trend, while the green water content showed a significant upward trend. Similarly, under the SSP5−8.5 pathway, the blue water content showed an insignificant downward trend, and the green water content also exhibited an insignificant upward trend. The average annual blue water volume under the three pathways decreased compared to the historical period, with annual averages of 128.8 mm, 117.2 mm, and 126 mm, respectively. Conversely, the average annual green water volume increased, recording values of 372.7 mm, 369.3 mm, and 372.1 mm, resulting in a green water coefficient higher than that of the historical period. The spatial distribution of blue-green water increased from northwest to southeast, with consistent spatial distribution characteristics across each pathway.

Keywords: SWAT model; Delta downscaling; climate change; CMIP6 climate model; blue-green water; Jinghe River Basin